

## RB セラミックス粒子を配合した鉄道集電用耐摩耗 すり板材料の開発に関する研究

|        |   |
|--------|---|
| 著者     | 柴田 圭  |
| 号      | 55  |
| 学位授与機関 | Tohoku University   |
| 学位授与番号 | 工博第4422号  |
| URL    | <a href="http://hdl.handle.net/10097/61467">http://hdl.handle.net/10097/61467</a> |

|               |  |
|---------------|--|
| 氏 名           | しば た けい                                    |
| 授 与 学 位       | 柴 田 圭                                      |
| 学 位 授 与 年 月 日 | 博士（工学）                                     |
| 学位授与の根拠法規     | 平成23年3月25日                                 |
| 研究科専攻の名称      | 学位規則第4条第1項                                 |
| 学 位 論 文 題 目   | 東北大学大学院工学研究科（博士課程）<br>機械システムデザイン工学専攻       |
| 指 導 教 員       | RB セラミックス粒子を配合した鉄道集電用耐摩耗すり板材料の<br>開発に関する研究 |
| 論 文 審 査 委 員   | 東北大学教授 堀切川 一男                              |
|               | 主査 東北大学教授 堀切川一男 東北大学教授 厨川 常元               |
|               | 東北大学教授 渡邊 豊 東北大学准教授 小川 和洋                  |

## 論文内容要旨

### 第1章 緒論

鉄道輸送産業分野では、安全性、快適性の追求に加えて、省エネルギー、低コストなど様々な要求のもとで、集電システムの飛躍的な寿命向上のため、鉄道集電用すり板材料の耐摩耗性の大幅な向上が求められている。すり板材料には従来、低い電気抵抗率、高強度、相手架線への低い攻撃性、優れた耐摩耗性が要求されるため、カーボンと銅の複合材料（Cu/C 複合材料）が用いられてきたが、更なる耐摩耗性の向上が求められており、新たな材料開発が必要となっている。そこで本研究では、低摩擦・優れた耐摩耗性を示す、米ぬかを原料とする硬質多孔性炭素材料である RB（Rice Bran）セラミックスに着目した。RB セラミックスは、一般的なカーボンと同程度の電気抵抗率を示すこと、多孔質であるため比表面積が大きく焼結時に強固な結合が期待されること、低ヤング率であるため相手材料攻撃性が低いことに加え、低摩擦・優れた耐摩耗性を同時に付与できる新しい充填剤であることなどから、鉄道集電用すり板材料に添加することで、飛躍的な耐摩耗性の向上が得られると考えられる。

以上のような背景のもとで、本論文では、銅にカーボン粒子及び RB セラミックス粒子を配合した銅/カーボン/RB セラミックス複合材料を開発し、同材料がすり板の用いられる各種環境下において飛躍的な耐摩耗性の向上、相手架線材料への攻撃性の大幅な低減を達成することを目的とする。さらに、この RB セラミックス粒子を摩耗低減剤として用いた複合材料の次世代鉄道集電用すり板材料への応用の可能性を検討する。

### 第2章 銅/カーボン/RB セラミックス複合材料の開発

本章では、現在鉄道集電用すり板材料として用いられている銅及びコークス・ピッチからなるカーボンに、粒径の異なる 3 種類の RB セラミックス粒子をそれぞれ 5, 10, 20 mass%配合した銅/カーボン/RB セラミックス複合材料を開発し、その機械的性質・電氣的性質を明らかにした。

鉄道集電用すり板材料として求められる電気抵抗率から、RB セラミックス粒子を 5, 10 mass%配合した銅/カーボン/RB セラミックス複合材料がすり板材料として使用可能であり、さらに、求められる曲げ強度から、RB セラミックス粒子を 5 mass%配合した、または平均粒径 4.9, 30.2  $\mu\text{m}$  の RB セラミックス粒子を 10 mass%

配合した銅/カーボン/RB セラミックス複合材料がすり板材料として使用可能であることを明らかにした。また、RB セラミックス粒子の配合率の増加に伴い、銅/カーボン/RB セラミックス複合材料の硬さが減少すること、平均粒径 82.8  $\mu\text{m}$  の RB セラミックス粒子を 5 mass% 配合した場合、及び平均粒径 4.9, 30.2  $\mu\text{m}$  の RB セラミックス粒子を 5 mass% あるいは 10 mass% 配合した場合、破壊靱性値は従来の銅/カーボン複合材料に比べ高い値を示すこと、などの知見が得られた (図 1)。

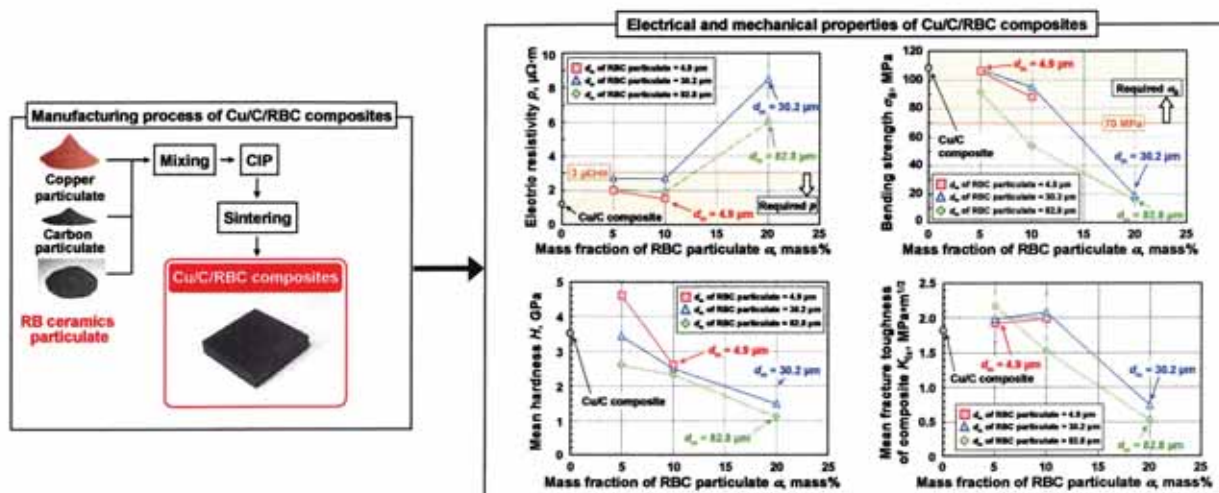


図 1 銅/カーボン/RB セラミックス複合材料の製造工程と電気的性質及び機械的性質

### 第 3 章 通電を伴わない大気中無潤滑下における銅/カーボン/RB セラミックス複合材料の摩擦・摩耗特性

本章では、第 2 章で開発された配合条件の異なる 8 種類の銅/カーボン/RB セラミックス複合材料について、ピンオンディスク型摩擦試験装置を用いて、通電を伴わない大気中無潤滑下において摩擦試験を行い、摩擦・摩耗特性を明らかにした。

銅/カーボン/RB セラミックス複合材料の摩擦係数及び比摩耗量は、RB セラミックス粒子の平均粒径及び配合率の増加に伴い増加し、平均粒径 4.9  $\mu\text{m}$  の RB セラミックス粒子を 5 mass% 配合した場合において最も低い値を示すことが判った。また、相手材料の比摩耗量は、平均粒径 4.9  $\mu\text{m}$  あるいは 30.2  $\mu\text{m}$  RB セラミックス粒子を配合した場合に低い値を示すことが判った。さらに、平均粒径 4.9  $\mu\text{m}$  の RB セラミックス粒子を 5 mass% 配合した銅/カーボン/RB セラミックス複合材料は、従来の複合材料に比べ、摩擦係数を 44.6 %、自身の摩耗を 99.5 %、相手材料の摩耗を 99.8 % 低減できることが明らかとなった (図 2)。これらの複合材料の摩耗面の観察により、平均粒径 4.9  $\mu\text{m}$  の RB セラミックス粒子を 5 mass% 配合した場合にカーボン部の脆性破壊型摩耗及び銅部の塑性流動が抑制されるため、低い比摩耗量が得られることが判った。

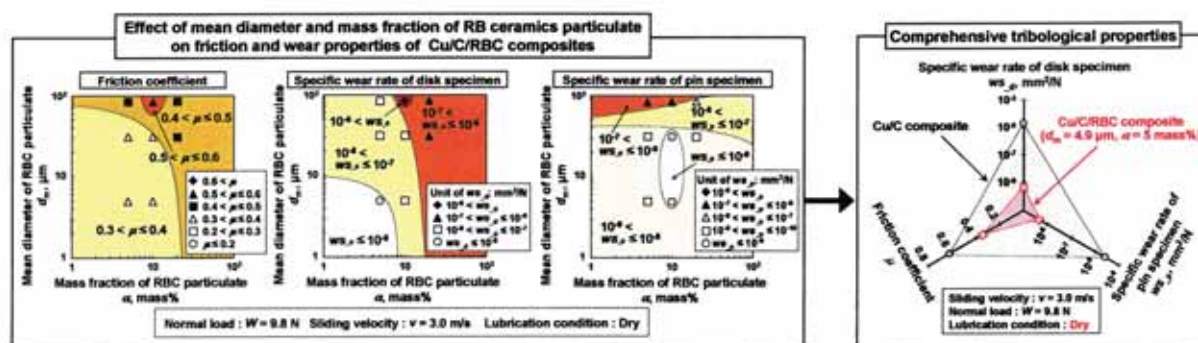


図 2 通電を伴わない大気中無潤滑下における銅/カーボン/RB セラミックス複合材料の摩擦・摩耗特性



## 第4章 通電を伴わない水潤滑下における銅/カーボン/RB セラミックス複合材料の摩擦・摩耗特性

本章では、第2章で開発された配合条件の異なる8種類の銅/カーボン/RB セラミックス複合材料について、ピンオンディスク型摩擦試験装置を用いて、精製水を滴下しながら摩擦試験を行い、通電を伴わない水潤滑下における摩擦・摩耗特性を明らかにした。

銅/カーボン/RB セラミックス複合材料の摩擦係数、比摩耗量及び相手材料の比摩耗量は、RB セラミックス粒子の平均粒径及び配合率の増加に伴い増加し、平均粒径  $4.9 \mu\text{m}$  のRB セラミックス粒子を5 mass%配合した場合において最も低い値を示すなどの知見が得られた。さらに、平均粒径  $4.9 \mu\text{m}$  のRB セラミックス粒子を5 mass%配合した銅/カーボン/RB セラミックス複合材料は、従来の複合材料に比べ、摩擦係数を70.0%、自身の摩耗を86.1%、相手材料の摩耗を99.1%低減できることが明らかとなった(図3)。

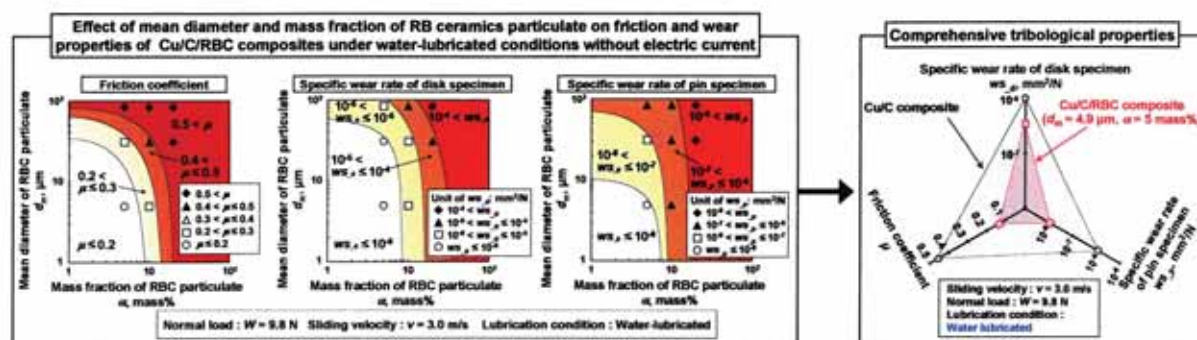


図3 通電を伴わない水潤滑下における銅/カーボン/RB セラミックス複合材料の摩擦・摩耗特性

## 第5章 通電を伴わない大気中無潤滑下における銅/カーボン/RB セラミックス複合材料の摩擦・摩耗特性

本章では、第2章で開発された平均粒径  $4.9 \mu\text{m}$  のRB セラミックス粒子を5 mass%配合した銅/カーボン/RB セラミックス複合材料について、実機を模擬したブロックオンリング型集電材摩耗試験装置を用いて、通電を伴いかつアーク放電を伴わない大気中無潤滑下、及び通電を伴いかつアーク放電を伴う大気中無潤滑下において摩擦試験を行い、摩擦・摩耗特性を明らかにし、鉄道集電用すり板材料の応用可能性を検討した。

アーク放電を伴う通電条件下において、銅/カーボン/RB セラミックス複合材料は、従来の複合材料と同等の耐摩耗性を示し、RB セラミックス粒子を配合することによる異常な摩耗の促進が見られないことが判った。また、アーク放電を伴わない通電条件下において、銅/カーボン/RB セラミックス複合材料は、従来の複合材料に比べ、摩擦係数を77.4%、自身の摩耗を98.0%、相手材料の摩耗を22.6%低減できることが判った。このことから、同複合材料は、摩擦仕事によるエネルギーロスを低減し、相手架線の摩耗を低減した上で長寿命を実現できるすり板材料として適用が期待できることが見出された(図4)。

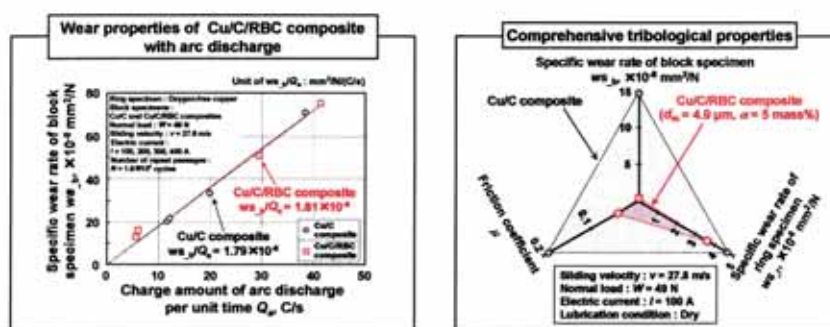


図4 通電を伴う大気中無潤滑下における銅/カーボン/RB セラミックス複合材料の摩擦・摩耗特性

## 第6章 銅/カーボン/RB セラミックス複合材料の摩耗のマイクロメカニズム

本章では、幅広い接触圧力条件下における摩擦試験を行い、銅/カーボン/RB セラミックス複合材料の摩擦のマイクロメカニズムを理論的に検討した。また、第3章から第5章まで得られた様々なしゅう動環境における銅/カーボン/RB セラミックス複合材料の優れた耐摩耗性の発現に対する RB セラミックス粒子の配合の効果について考察を行うとともに、さらなる耐摩耗性向上のための設計指針を提案した。

アルミナピン試験片及びダイヤモンドピン試験片との摩擦において、銅/カーボン/RB セラミックス複合材料においては、ヘルツ最大接触圧力がおよそ 2.8 GPa、一方、従来の複合材料においては、ヘルツ最大接触圧力がおよそ 2.1 GPa となると、比摩耗量は、 $1 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{N}$  以下の値から急激に増加し、カーボン部あるいはカーボン/RB セラミックス部の脆性破壊型摩耗及び銅部の大規模な塑性流動を伴う激しい摩耗が生じることが判った。これらの摩耗形態の遷移は、セラミックスの摩耗形態図を基に、ヘルツ最大接触圧力  $p_{\max}$  と最大高さ粗さ  $R_{\max}$  と破壊靱性値  $K_{Ic}$  により表される無次元パラメータ  $S_c$  と摩擦係数  $\mu$  によって説明が可能であり、大規模な脆性破壊型摩耗となる領域では、摩耗面のカーボン部あるいはカーボン/RB セラミックス部の脆性破壊が見られた。

また、摩耗の過酷さを表す新しい無次元パラメータ  $S_w$  (Severity of wear) を導入した。 $S_w$  は、それぞれの実験条件における無次元パラメータ  $S_c$  と、その摩擦係数において大規模な脆性破壊型を開始する臨界無次元パラメータ  $S_{c0}$  との比である。本実験で得られた比摩耗量を、 $S_w$  を用いて評価した結果、 $S_w$  値がおよそ 0.6 以上で比摩耗量が急増することが明らかとなった。

さらに、無次元パラメータ  $S_w$  を用いて、第3章、第4章、第5章における各複合材料の比摩耗量の整理を行い、ヘルツ最大接触圧力、最大高さ粗さ、破壊靱性値及び摩擦係数を用いた同材料の比摩耗量の予測式を導いた（図5）。この予測式より、RBセラミックス粒子を配合することで、破壊靱性値の向上と摩擦係数の低減によって  $S_w$  値が減少し、比摩耗量が低減することが判った。この予測式を用いることにより、RBセラミックス粒子配合の有効性を示すとともに、銅/カーボン/RBセラミックス複合材料の耐摩耗性向上のための新たな設計指針を提案した。

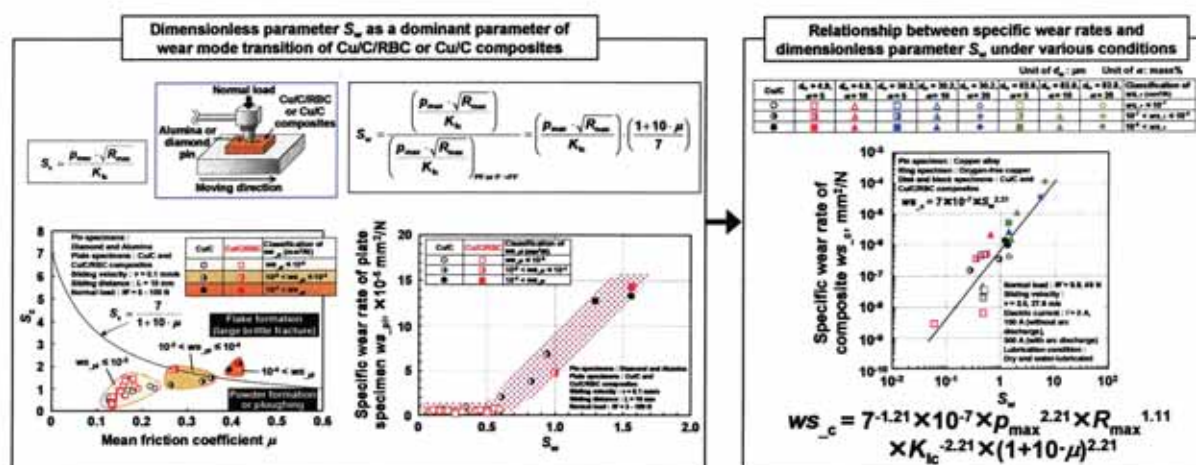


図5 銅/カーボン/RBセラミックス複合材料の摩耗形態図及び比摩耗量と無次元パラメータ  $S_w$  の関係

## 第7章 結論

本章では、第2章から第6章まで得られた主な知見を示し、本研究の総括を行った。



# 論文審査結果の要旨

鉄道輸送産業分野では、集電システムの飛躍的な寿命向上のために、鉄道集電用すり板材料の耐摩耗性の大幅な向上が求められている。本研究は、銅にコークス・ピッチ系カーボン粒子及び米ぬかを原料とした硬質多孔性炭素材料である RB セラミックス粒子を配合した銅/カーボン/RB セラミックス複合材料を開発し、同材料が優れた摩擦・摩耗特性を示すことを明らかにするとともに、鉄道集電用すり板材料として応用できる可能性を示したものである。本論文は、これらの研究成果についてまとめたものであり、全編 7 章からなる。

第 1 章は緒論であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。

第 2 章では、銅/カーボン/RB セラミックス複合材料を製造し、同複合材料の電氣的性質及び機械的性質に及ぼす RB セラミックス粒子の平均粒径及び配合率の影響を明らかにしている。これは、学術的に有益な成果である。

第 3 章では、平均粒径  $4.9\ \mu\text{m}$  の RB セラミックス粒子を 5 mass% 配合した銅/カーボン/RB セラミックス複合材料が、通電を伴わない大気中無潤滑下において、極めて優れた耐摩耗性を示すことなどを明らかにしている。これは、同複合材料を鉄道集電用すり板材料として用いるための好適な RB セラミックス粒子の配合条件を明らかにしたものであり、工業的に極めて重要かつ有益な知見である。

第 4 章では、平均粒径  $4.9\ \mu\text{m}$  の RB セラミックス粒子を 5 mass% 配合した銅/カーボン/RB セラミックス複合材料が、通電を伴わない水潤滑下において、優れた耐摩耗性を示すことなどを明らかにしている。これは、雨天時においても、同複合材料が鉄道集電用すり板材料として用いることが有効であることを明らかにしたものであり、工業的に極めて有益な知見である。

第 5 章では、銅/カーボン/RB セラミックス複合材料が、通電を伴う大気中無潤滑下において、従来のすり板材料に比べおよそ 50 倍の耐摩耗性を示すことなどを明らかにしている。これは、銅/カーボン/RB セラミックス複合材料が、鉄道集電用すり板材料として応用できる可能性を示したものであり、工業的に極めて有益な成果である。

第 6 章では、銅/カーボン/RB セラミックス複合材料の摩耗のマイクロメカニズムについて理論的に詳細な検討を行い、最終的にヘルツ最大接触圧力、最大高さ粗さ、破壊靱性値及び摩擦係数を用いて、同材料の比摩耗量の予測式を導くことに成功している。これは、銅/カーボン/RB セラミックス複合材料のさらなる耐摩耗性向上のための新たな材料設計指針を与えるものであり、学術的にも工業的にも極めて有益な知見である。

第 7 章は結論である。

以上要するに本論文は、銅/カーボン/RB セラミックス複合材料を開発し、同材料が鉄道集電用耐摩耗すり板材料として応用できる可能性を示すとともに、耐摩耗複合材料としての設計指針を確立したものであり、機械システムデザイン工学および機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。